

Jurnal Review: Metode Konstruksi Dan Perilaku *Stone Column* Sebagai Perkuatan Tanah Dasar Timbunan

* Himatul Farichah¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*himatul_farichah.ts@upnjatim.ac.id

Abstract

Rapid increase in constructions recently have undisputedly increased the importance of ground improvement methods. Stone column is one of the most well know ground improvement method. This method is able to increase bearing capacity and reduce foundation settlement on soft cohesive soils, reduce the liquefaction potential for non-cohesive soils, and provide reinforcement for slopes and embankments. This study discusses the stone column construction methods, mechanism and behavior of stone columns as reinforcement under embankment through recent studies.

Keywords: *Stone column*, Ground improvement method, Embankment

Abstrak

Pesatnya perkembangan konstruksi belakangan ini telah meningkatkan pentingnya metode perbaikan tanah. Kolom batu (*stone column*) adalah salah satu metode perbaikan tanah yang sudah umum digunakan. Metode ini mampu menaikkan daya dukung dan mengurangi penurunan pondasi pada tanah kohesif yang lunak, mampu mengurangi potensi likuifaksi pada tanah non kohesif, dan mampu memberikan perkuatan untuk lereng dan timbunan. Studi ini membahas mengenai metode konstruksi *stone column*, mekanisme dan perilaku *stone column* sebagai perkuatan tanah dasar timbunan melalui hasil studi yang terbaru.

Kata Kunci: *Stone column*, Metode Perbaikan Tanah, Timbunan

PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan dunia konstruksi beberapa tahun belakangan membuat peningkatan pentingnya metode perbaikan tanah. Diantara banyaknya metode perbaikan tanah (seperti *vertical drain*, pemadatan dinamik, *surcharge* dan *vacuum preloading*, dan lain-lain), kolom batu (*stone column*) adalah salah satu metode perbaikan tanah yang sudah umum digunakan. Konsep perbaikan tanah dengan *stone column*, nampaknya, pertama kali diaplikasikan di Perancis pada tahun 1830 untuk perbaikan tanah disana (Dheerendra Babu et al., 2013). Metode ini mampu menaikkan daya dukung dan mengurangi penurunan pondasi pada tanah kohesif yang lunak, mampu mengurangi potensi likuifaksi pada tanah non kohesif, dan mampu memberikan perkuatan untuk lereng dan timbunan (Etezad et al., 2015).

Stone column adalah metode perbaikan dengan melakukan penggantian pada sebagian tanah dasar konstruksi dengan kolom batu yang dipadatkan. Dengan demikian, akan tercipta material komposit antara kolom batu tersebut dengan tanah sekitar yang memiliki kompresibilitas yang lebih rendah (Greenwood, 1970, Poorooshasb & Meyerhof, 1997). Material komposit tersebut akan memiliki *shear strength* yang lebih baik dibanding dengan tanah lunak semula (Basack et al., 2015). Sistem perbaikan tanah dengan *stone column* yang diaplikasikan pada tanah lunak yang kompresibel, sederhananya seperti pondasi tiang (*pile*) tanpa *pile cap*, tidak perlu ditanam hingga tanah keras, dan tentu saja *stone column* lebih kompresibel (J. Mitchell, 1981). Sedangkan *stone column* yang diaplikasikan pada tanah pasir lepas mampu mengurangi potensi likuifaksi. Hal ini karena dengan adanya *stone column* mampu mendisipasi tekanan air pori yang timbul ketika ada beban dinamis dari gempa (J. K. Mitchell & Huber, 1985). Salah satu aplikasi

dari *stone column* di Indonesia yaitu pada proyek pembangunan *runway* bandara Soekarno-Hatta (Maulidina et al., 2019).

Stone column adalah salah satu metode yang umum digunakan juga untuk perbaikan tanah lunak di bawah timbunan. *Stone column* sendiri memiliki beberapa tipe, diantaranya yaitu yang terbungkus, melayang (*floating*) dan yang paling umum adalah tipe *end-bearing* (Ng & Tan, 2014). Meskipun demikian pemilihan *stone column* tipe melayang didasari oleh beberapa hal (Jung et al., 1998). Diantaranya yaitu (1) pertimbangan biaya konstruksi, (2) keterbatasan alat konstruksi, (3) mengantisipasi aliran air dari lapisan bawah ke *stone column*, (4) mengantisipasi aliran air kotor dari permukaan tanah ke sumber air tanah di dasar. Selain itu, *stone column* umumnya dikombinasikan dengan lapisan kaku di dasar timbunan jika digunakan untuk perbaikan tanah lunak di bawah timbunan. Lapisan tersebut bisa berupa lapisan granular yang kaku, *geotextile* atau *geogrid*. Studi mengenai pemodelan *stone column* sebagai perkuatan lempung lunak baik dalam skala laboratorium maupun pemodelan numerik juga sudah banyak dilakukan.

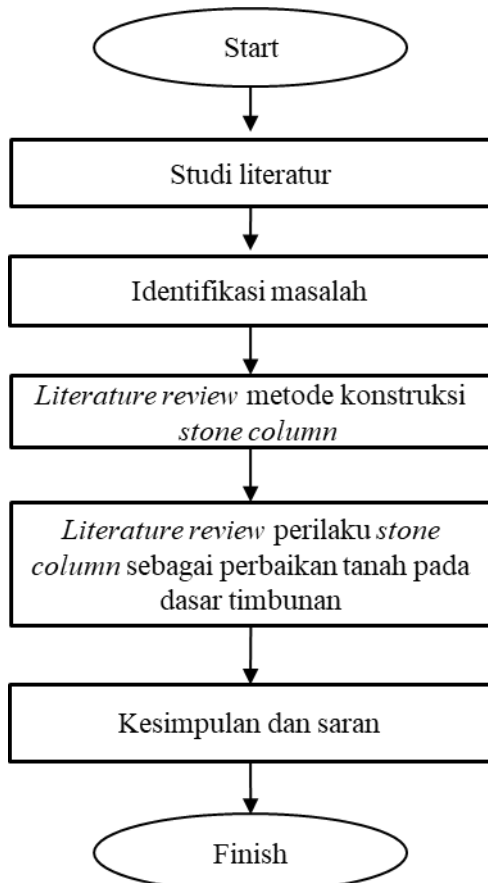
Oleh karena itu, pada studi ini dilakukan *review* mengenai metode konstruksi dari *stone column* dan perilaku *stone column* sebagai metode perbaikan tanah dasar timbunan baik dari sisi permodelan numerik maupun eksperimen,

METODE

Langkah-langkah atau rancangan penelitian pada studi ini sebagai berikut sesuai dengan diagram alir pada Gambar 1.

1. *Start*.
2. Studi literatur mengenai *stone column*, perkembangan research tentang *stone column* dalam 10 tahun terakhir.

3. Identifikasi masalah terkait pesatnya perkembangan studi *stone column* dalam 10 tahun terakhir.
4. Pembahasan lebih mengerucut mengenai metode konstruksi *stone column* berdasarkan hasil *literature review*.
5. Tahap selanjutnya adalah mengenai perilaku *stone column* sebagai metode perbaikan tanah dasar timbunan. Pada tahap ini akan dipaparkan hasil *literature review* baik dari hasil eksperimen maupun numerik yang sudah dilakukan dalam 10 tahun terakhir.
6. Dari poin 3 hingga poin 5 maka dapat dirumuskan kesimpulan dan saran.
7. *Finish*



Gambar 1. Diagram alir metode penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode Konstruksi *Stone column*

Metode konstruksi *stone column* adalah dengan menentukan titik *stone column* yang kemudian akan diisi oleh batuan atau campuran batuan dengan pasir dengan porsi tertentu yang dipadatkan sehingga mencapai kolom dengan kekuatan yang direncanakan. Beberapa metode konstruksi sudah banyak diterapkan tergantung dari kesediaan alat pada lokasi proyek tersebut.

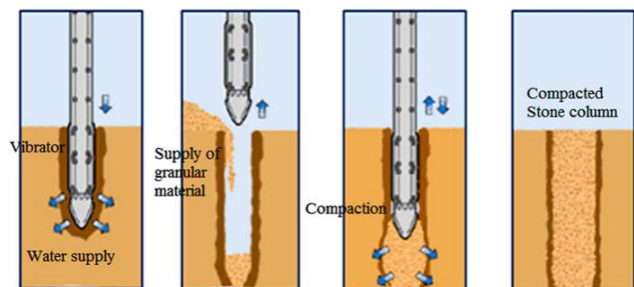
Metode *vibro-replacement* dan *vibro-displacement* adalah metode konstruksi *stone column* yang sudah umum digunakan. Keduanya memiliki teknik menggunakan *vibratory probe* (kepala penggetar disebut *vibroflot*) yang dimasukkan ke dalam tanah untuk membentuk lubang ko-

lom dan memadatkan material granular yang nanti dimasukkan ke dalam kolom. *Vibrating probe* akan menggetarkan sehingga tanah akan terdesak atau bergerak secara lateral. Perbedaan utama antara *vibro-replacement* dan *vibro-displacement* ini adalah pada media yang digunakan untuk membantu *vibroflot* (Kirsch & Bell, 2012). *Vibro-replacement* menggunakan penyeprot air (*water jetting*) atau dikenal dengan metode basah (*wet method*). Metode ini sudah banyak diterapkan untuk instalasi *stone column* pada tanah kohesif (Balaam & Booker, 1981). Sedangkan *vibro-replacement* dikenal dengan metode kering (*dry method*) karena menggunakan penyempnot udara (*air jetting*). Perbandingan antara *dry method* dan *wet method* akan dibahas lebih detail sebagai berikut.

a. *Wet method*

Pada metode ini, probe diposisikan pada titik rencana. Kemudian dilakukan penetrasi dengan kecepatan 0.3-0.5 m/min (Han, 2015) ke dalam tanah hingga kedalaman rencana dengan menggunakan *water jetting* seperti pada Gambar 2. Jika kedalaman lubang sudah sesuai rencana maka batuan dengan ukuran 12-75 mm dimasukkan dari atas ke dalam lubang. Material granular / batuan tersebut dipadatkan setiap 0.6 – 1.2 m (Han, 2015). Metode ini diterapkan pada tanah kohesif yang umumnya memiliki kekuatan 15 – 50 kPa dengan kondisi muka air tanah yang tinggi (Greenwood & Kirsch, 1983).

Salah satu kelebihan dari metode basah ini adalah berkurangnya polusi udarah yang dihasilkan. Tetapi karena media penyempnotan menggunakan air, sehingga membutuhkan air yang cukup banyak. Selama proses pelaksanaan juga akan menghasilkan lumpur yang perlu di atur dengan baik untuk menjaga kebersihan dan keselamatan di area kerja.

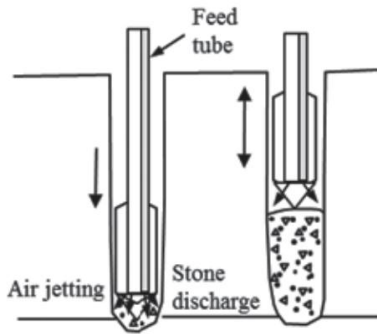


Gambar 2. Metode *vibro-replacement* dengan metode basah (Dheerendra Babu et al., 2013)

b. *Dry method*

Pada metode ini, media penyempnot yang digunakan untuk membentuk lubang kolom bukanlah air tetapi udara. Material granular atau batuan dimasukkan ke dasar lubang melalui pipa pada probe seperti pada Gambar 3. Pada metode ini, lubang harus mampu berdiri tegak dengan stabil, sehingga metode ini cocok untuk tanah kohesif yang memiliki undrained shear strength antara 30-60 kPa (Greenwood & Kirsch, 1983).

Kelebihan dari metode ini adalah lebih sedikitnya lumpur yang dihasilkan dibandingkan dengan metode basah. Selain itu juga area kerja akan lebih bersih karena batuan dimasukkan dari dasar kolom.



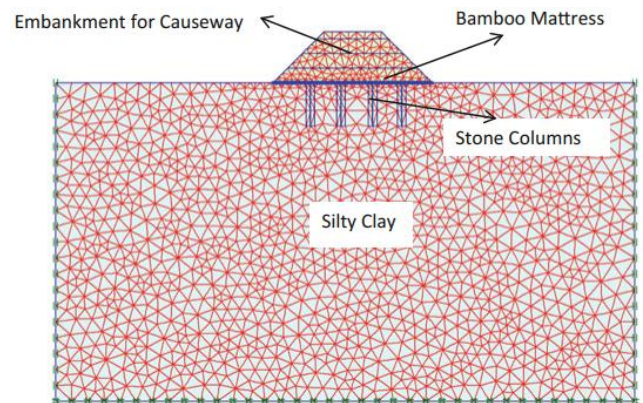
Gambar 3. Metode *vibro-displacement* dengan metode kering (Han, 2015)

Stone column sebagai perbaikan tanah dasar timbunan

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan dalam perencanaan *stone column* diantaranya adalah tipe tanah, ketebalan tanah yang diperbaiki, kedalaman muka air tanah, material granular yang digunakan (gradasi dan sudut geser), pola kolom (segitiga atau persegi), spasi kolom, diameter kolom, area yang diperbaiki dan tipe metode konstruksi (Han, 2015).

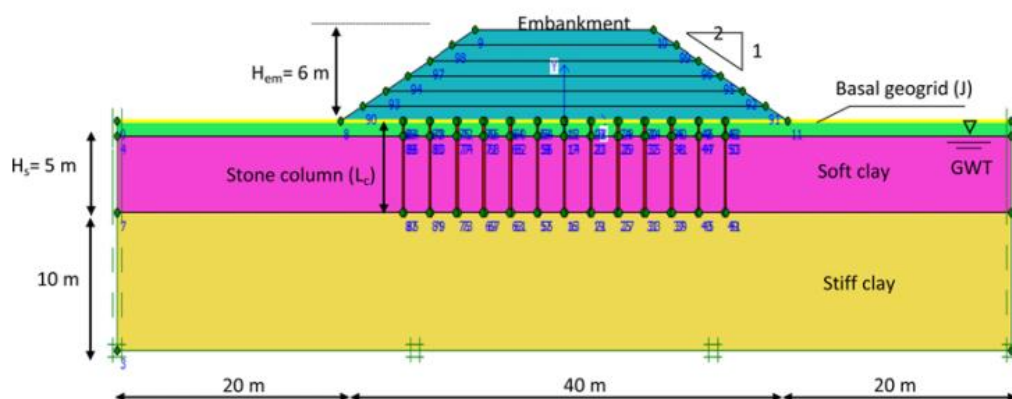
Stone column sering kali digunakan sebagai perbaikan tanah dasar timbunan. Studi telah dilakukan oleh Arsyad et al., 2019 mengenai pemodelan numerik terhadap timbunan di atas tanah lunak dengan perbaikan *stone column* dan kombinasi matras bambu pada dasar timbunan. *finite element method* (FEM) dengan program bantu Plaxis digunakan dalam pemodelan tersebut. *Stone column* dimodelkan sebagai material tanah yang memiliki permeabilitas tinggi (*mohr coulomb-drained*) dan matras bambu dimodelkan sebagai *plate*. Hasil studi tersebut menunjukkan, *stone column* mampu mempercepat penurunan (*settlement*) hingga 96%. Sedangkan penggunaan matras bambu dapat meningkatkan daya dukung (*bearing capacity*) hingga 2 (dua) kali lipat dibandingkan timbunan tanpa matras bambu. Selain itu, kombinasi antara *stone column* dan matras bambu pada dasar timbunan ternyata mampu mengurangi penurunan hingga 54.6% penurunan yang terjadi jika timbunan tidak diperkuat sama sekali. Kombinasi keduanya

mampu membuat *stone column* sebagai vertical drain sedangkan matras bambu sebagai pendistribusi beban,



Gambar 4. finite element method (FEM) model untuk timbunan dengan *stone column* dan matras bambu (Arsyad et al., 2019)

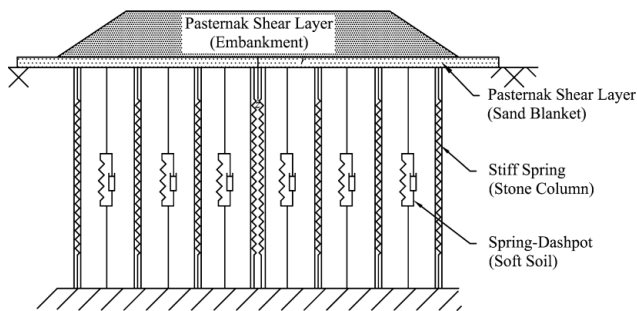
Studi lain dari Ghorbani et al., 2021 dilakukan dengan pemodelan numerik dua dimensi (2D) untuk mengetahui bagaimana pengaruh *stone column* pada timbunan yang berada di atas tanah lunak dengan lapisan *geogrid* pada dasar timbunan dengan model seperti pada Gambar 5. Parameter studi telah dilakukan dengan hasil parameter studi menunjukkan bahwa semakin lebar spasi antar kolom maka penurunan di bawah timbunan akan meningkat. Peningkatan sudut geser tanah akan memberikan efek yang signifikan pada penurunan di bawah timbunan. Peningkatan sudut geser material granular akan memberikan efek yang signifikan pada penurunan total deformasi pada tanah dasar. Kedalaman *stone column* akan memberikan pengaruh yang tinggi pada deformasi total dan tekanan pori berlebih (*excess pore pressure*). Kedalaman kolom antara $0.25H_s$ – $0.75H_s$ mampu mengurangi penurunan deformasi vertikal dan horizontal sebanyak dua dan lima kalinya, berurutan. Sehingga stabilitas timbunan meningkat pada kedalaman kolom tersebut.



Gambar 5. model numerik timbunan dengan perkuatan *stone column* dan *geogrid* pada dasar timbunan (Ghorbani et al., 2021)

Pemodelan *stone column* di bawah timbunan

Beberapa studi telah dilakukan untuk mempelajari perilaku *stone column* sebagai perbaikan tanah lunak berdasarkan asumsi yang berbeda-beda, metode analisis dan penerapannya, terkait pemodelan *stone column* secara numerik dan mekanik. *Stone column* bisa dianalisis dengan pendekatan *unit cell*, *plane strain* maupun *axi-symmetric*. Studi dari (Das & Deb, 2017) telah dilakukan dengan memodelkan *stone column* sebagai perkuatan di bawah timbunan dengan kondisi *axi-symmetric*. Setiap elemen dimodelkan secara mekanik seperti pada Gambar 6. Besar *settlement* maksimum yang terjadi pada model *axi-symmetric* untuk derajat konsolidasi 100% lebih kecil dibandingkan dengan model *plane-strain* di kondisi yang sama. Untuk rasio diameter (*diameter influenced zone/diameter stone column*) yang rendah, model *axi-symmetric* memberikan hampir sama atau lebih rendah derajat konsolidasi dibandingkan dengan derajat konsolidasi dengan pendekatan *unit cell*. Jika diameter rasio meningkat maka model *axi-symmetric* memberikan derajat konsolidasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendekatan *unit cell*.

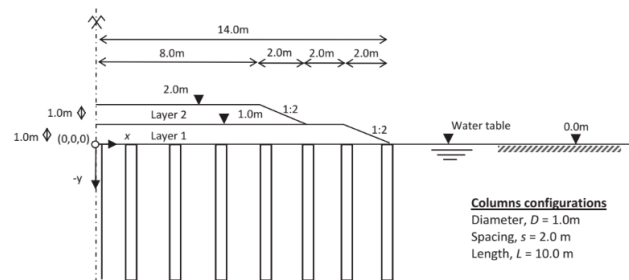


Gambar 6. model *stone column* di bawah timbunan (Das & Deb, 2017)

Pemodelan *Stone column* melayang di bawah timbunan dengan 3D model

Stone column adalah metode perbaikan tanah yang ditanam sedalam kedalaman tanah lunak sehingga ujung *stone column* berada pada lapisan tanah yang cukup baik (*stone column end bearing*). *Stone column* bisa juga diaplikasikan melayang, artinya ujung *stone column* tidak ditanam sedalam kedalaman tanah lunak. Beberapa studi menyebutkan bahwa *stone column* melayang ini mampu mengurangi *settlement* (Gäb et al., 2007; Schweiger et al., 2008). Berdasarkan analisis elemen hingga, rasio kedalaman *stone column* dan kedalaman tanah lunak yang bisa seefektif *stone column end bearing* dalam menopang beban timbunan adalah 0.5 (Mohamedzein & Al-Shibani, 2011). Tetapi hal ini tentu saja tergantung dari fondasi timbunan, kekakuan dan ketebalan tanah lunak. Studi terhadap *stone column* yang melayang dibawah timbunan dengan model 3D dan beberapa konstitutif model tanah telah dilakukan oleh (Ng & Tan, 2014). Pada studi tersebut timbunan berada diatas Singapura marine clay dengan model *hardening soil* (HS), *soft soil* (SS), *modified Cam-clay* (MMC), dan *Mohr-Coulomb* (MC). Potongan *stone column* dan timbunan pada studi tersebut dapat dilihat pada Gambar 7. MC model

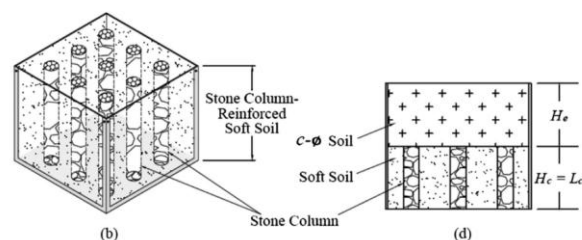
menunjukkan hasil *vertical displacement* pada dasar kolom yang 1.5 kali lebih besar dibandingkan dengan model lainnya. Model yang lebih lanjutan / *advance* lebih disarankan untuk mendapatkan hasil yang kecocokan yang lebih baik dengan pengukuran lapangan.



Gambar 7. Model *Stone column* (Ng & Tan, 2014)

Perilaku timbunan tanah kohesif-friksional yang diperkuat dengan *stone column* (eksperimen dan pemodelan numerik 3D)

Beberapa studi telah banyak membahas mengenai perilaku tanah timbunan di atas tanah lunak yang diperkuat dengan *stone column*. Efek mengenai kandungan butiran halus pada timbunan terhadap perilaku timbunan yang diperkuat dengan *stone column*, belum pernah dibahas pada studi sebelumnya. Sehingga studi dilakukan oleh (Kumar Das & Deb, 2019) terhadap pengaruh kandungan butiran halus pada timbunan yang diperkuat dengan *stone column* melalui uji laboratorium dan pemodelan numerik 3D. Model *stone column* dan timbunan pada uji laboratorium sesuai Gambar 8. *Vertical displacement* pada tanah dasar meningkat seiring dengan peningkatan jumlah butiran halus dan perubahan tersebut tidak lagi signifikan ketika kandungan butiran halus melebihi 20%. *Differential settlement* pada permukaan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kandungan butiran halus. Keberadaan butiran halus akan menyebabkan peningkatan tekanan pori sehingga dapat meningkatkan waktu konsolidasi. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk membuat seminimal mungkin kandungan butiran halus pada timbunan.



Gambar 8 Model *stone column* dan timbunan untuk uji laboratorium (Kumar Das & Deb, 2019)

KESIMPULAN

Dari hasil studi literatur mengenai perkembangan *stone column* dalam 10 tahun terakhir maka dapat disimpulkan bahwa metode konstruksi *stone column* secara umum ada 2 (dua) metode. Yaitu metode basah (*wet method*) dan metode kering (*dry method*). Kedua metode

konstruksi tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. *Stone column* adalah metode perbaikan tanah dasar timbunan yang bisa dikombinasikan dengan lapisan kaku di dasar timbunan. Lapisan kaku tersebut bisa berupa lapisan *geogrid*, lapisan granular, dan lapisan matras bambu. *Stone column* telah dimodelkan menggunakan pendekatan model unit cell dan *axi-symmetric*. Selain itu, tanah lunak di bawah timbunan yang diperkuat dengan *stone column* juga telah dimodelkan dengan beberapa pendekatan konstitutif model seperti model *hardening soil* (HS), *soft soil* (SS), *modified Cam-clay* (MMC), dan *Mohr-Coulomb* (MC). Kandungan butiran halus (*fine content*) pada timbunan juga akan memberikan respon yang berbeda terhadap *stone column* di bawahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, A., Samang, L., Bakri Muhiddin, A., Harianto, T., & Djamaluddin, A. R. (2019). Numerical Modelling of Reinforced *Stone columns* and Bamboo Mattress for Supporting Causeway Embankment on Soft Soil Bed. In *Sustainable Civil Infrastructures*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95744-9_7
- Balaam, N. P., & Booker, J. R. (1981). Analysis of rigid rafts supported by granular piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5(4), 379–403. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nag.1610050405>
- Basack, S., Indraratna, B., & Rujikiatkamjorn, C. (2015). Theoretical and Numerical Perspectives on Performance of Stone-Column-Improved Soft Ground with Reference to Transport Infrastructure. In *Ground Improvement Case Histories*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100192-9.00026-0>
- Das, A. K., & Deb, K. (2017). Modeling of *Stone column*-Supported Embankment Under Axi-Symmetric Condition. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2), 707–730. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0136-1>
- Dheerendra Babu, M. R., Nayak, S., & Shivashankar, R. (2013). A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of *Stone columns*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9555-9>
- Etezad, M., Hanna, A. M., & Ayadat, T. (2015). Bearing Capacity of a Group of *Stone columns* in Soft Soil. *International Journal of Geomechanics*, 15(2), 04014043. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000393](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000393)
- Gäb, M., Schweiger, H., Thurner, R., & Adam, D. (2007). Field Trial to investigate the performance of a floating *stone column* foundation. *14th Uropean Conference on Soil Echanics and Geotechnical Nginering*, 1311–1316.
- Ghorbani, A., Hosseinpour, I., & Shormage, M. (2021). Deformation and Stability Analysis of Embankment over *Stone column*-Strengthened Soft Ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(2), 404–416. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0349-y>
- Greenwood, D. A. (1970). 2. MECHANICAL IMPROVEMENT OF SOILS BELOW GROUND SURFACE. In *GROUND ENGINEERING* (pp. 11–22). Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/doi:10.1680/ge.44647.0003>
- Greenwood, D. A., & Kirsch, K. (1983). Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods. *International Conference on Piling and Ground Treatment*, 17–45. <https://doi.org/10.1680pagt.01855.0002>
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=2zoxBwAAQB>
- Jung, J. B., Moriwaki, T., Sumioka, N., & Kusakabe, O. (1998). Numerical analyses and model tests of composite ground improved by partly penetrated sand compaction Piles. *Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Techniques*, 213–220.
- Kirsch, K., & Bell, A. (2012). *Ground improvement*. CRC Press.
- Kumar Das, A., & Deb, K. (2019). Response of *stone column*-improved ground under c- ϕ soil embankment. *Soils and Foundations*, 59(3), 617–632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.01.003>
- Maulidina, K., Andienti, T., Pradiptiya, A., Maulidina, K., Andienti, T., Pradiptiya, A., & Stone, P. (2019). *PERHITUNGAN ULANG DAYA DUKUNG STONE COLUMN PADA PROYEK RUNWAY 3 SECTION 2 BANDARA SOEKARNO-HATTA dalam Tugas Akhir ini adalah berdasarkan data Standard Penetration Test (SPT) pada Proyek Runway 3 Manfaat Penulisan Manfaat penulisan Tugas Akhir ini adala.*
- Mitchell, J. (1981). Soil improvement—state of the art report. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 51–59.
- Mitchell, J. K., & Huber, T. R. (1985). Performance of a *stone column* foundation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2), 205–223.
- Mohamedzein, Y., & Al-Shibani, I. (2011). Performance of An Embankment Supported on Soft Soil Reinforced by *Stone columns*. *Ground Improvement*, 164, 213–224.
- Ng, K. S., & Tan, S. A. (2014). Nonlinear Behaviour of an Embankment on Floating *Stone columns* Nonlinear Behaviour of an Embankment on Floating *Stone columns*. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, February 2015, 37–41. <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.902118>
- Poorooshasb, H. B., & Meyerhof, G. G. (1997). Analysis of behavior of *stone columns* and lime columns. *Computers and Geotechnics*, 20(1), 47–70. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(96\)00013-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0266-352X(96)00013-4)
- Schweiger, H., Karstunen, M., Gäb, M., & Kamrat-Pietraszewska, D. (2008). Numerical analysis of a floating *stone column* foundation using different constitutive models. In *Geotechnics of Soft Soils: Focus on Ground Improvement* (pp. 137–142).

Oxford: Taylor and Francis.
<https://doi.org/10.1201/9780203883334.ch15>